

Pemodelan Sistem Pengatur Ketinggian Air pada Sebuah Tangki Tunggal

Joni Dewanto

Dosen Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra

Yohanes Trilaksono Dibyo Suprpto

Dosen Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Elektro – Universitas Kristen Petra

Hega Rismawan Candra

Alumnus Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra

Abstrak

Makalah ini membahas bagaimana memodelkan dan memvalidasi suatu sistem pengatur ketinggian air. Sistem terdiri dari sebuah tangki tunggal, sensor ketinggian muka air, pompa, driver pompa dan elemen-elemen perubah ADC dan DAC. Pemodelan sistem keseluruhan disusun dari pemodelan elemen-elemen yang diturunkan secara empirik. Validasi atas pemodelan sistem ini dilakukan dengan cara membandingkan kurva respon dari model persamaan sistem secara keseluruhan dan kurva respon riil dari hasil pengukuran. Pemodelan sistem ini menunjukkan hasil yang cukup baik.

Kata kunci : pemodelan, kontrol tinggi permukaan air, Algoritma PID, visualisasi.

Abstract

This paper describes how to model and validate a control system of water level in a tank. The system consists of single tank, water level sensor, pump, pump driver, AD and DA converter. Each element system models is derived empirically and then the whole system models is built from these models. Validation of this system modelling can be done by comparing theoretical response curve and actual response curve. Theoretical response curve plotted according to the equation of system modelling and actual response curve plotted according to the measurements. Validation of this system modelling shows that the modelling is good enough.

Keywords: modeling, water level control, PID algorithm, visualization

1. Pendahuluan

Pemodelan merupakan upaya yang sangat penting baik untuk mengetahui perilaku maupun untuk mengatur suatu sistem. Dengan model orang dapat menjelaskan bagaimana suatu sistem berperilaku. Bahkan orang juga dapat meramalkan apa yang akan terjadi pada sistem tersebut tanpa melakukan simulasi pada sistem yang sesungguhnya. Dengan adanya model maka biaya untuk menganalisa dan memperbaiki sistem menjadi sangat murah dan tidak beresiko tinggi.

Pada dasarnya pemodelan dilakukan untuk dua tujuan yang berbeda yaitu pemodelan untuk mengetahui perilaku suatu sistem dan pemodelan untuk merancang suatu sistem pengatur. Pemodelan untuk merancang suatu

sistem pengatur biasanya dilakukan dengan banyak penyederhanaan yang hanya memperhatikan masukan, keluaran dan gangguan yang ada. Parameter-parameter lain yang tidak berhubungan langsung dengan ketiga parameter tersebut diabaikan atau dianggap konstan. Pemodelan untuk maksud ini dilakukan melalui analisa dinamik atau melalui uji eksperimen dengan mengukur masukan dan keluaran sistem.

Pemodelan untuk mengetahui perilaku sistem dibedakan menjadi dua yaitu pemodelan skala dan pemodelan dengan simulasi komputer. Model skala digunakan jika sistem yang dipelajari sangat kompleks sehingga sulit dirumuskan secara detail dan teliti. Pemodelan dari sistem yang lebih sederhana dapat dinyatakan dalam bentuk rumusan matematik. Model ini biasanya diselesaikan dengan simulasi komputer karena melibatkan banyak perhitungan yang harus dilakukan.

Makalah ini membahas bagaimana memodelkan sistem pengatur ketinggian air

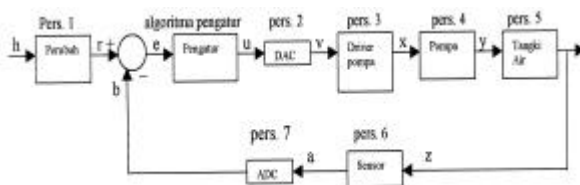
Catatan : Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Juli 2000. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Mesin Volume 2 Nomor 2 Oktober 2000.

pada sebuah tangki tunggal. Sistem ini sederhana akan tetapi menjadi sangat menarik karena parameter yang diatur yaitu perubahan ketinggian permukaan air yang diinginkan dapat dilihat secara visual. Sistem ini terdiri dari sebuah tangki dengan dua buah katup buang, sensor ketinggian air, perangkat pengolah sinyal dan pengatur serta sebuah pompa sirkulasi. Katup buang pertama dapat diatur pada tiga posisi, masing-masing memiliki bukaan yang tetap. Katup kedua merupakan katup solenoid yang akan terbuka atau tertutup penuh sesuai dengan sinyal pengatur *on-off* yang diterima. Secara operasional katup kedua ini lebih difungsikan sebagai pengaman agar volume air di dalam tangki tidak berlebihan. Pompa yang digunakan berpenggerak motor DC 12 Volt sehingga mudah pengendaliannya. Untuk sensor ketinggian digunakan sebuah potensiometer 5K Ω sepuluh putaran 5V. Jenis ini mempunyai linieritas tinggi pada setiap putarannya. Sedang pengaturan sistem dilakukan dengan menggunakan PC, untuk itu diperlukan beberapa konverter ADC dan DAC. Ukuran Tangki, katup dan kapasitas pompa direncanakan secara proporsional agar sistem dapat berjalan dengan waktu yang cukup untuk menunjukkan perubahan-perubahan yang terjadi.

Tiap elemen sistem dimodelkan secara terpisah dan dicari fungsi alihnya dengan mengukur masukan dan keluarannya. Selanjutnya dibuat program sistem pengaturan yang melibatkan semua fungsi alih tersebut. Validasi pemodelan dilakukan dengan cara membandingkan antara pengukuran yang sesungguhnya terjadi dengan hasil analisa perhitungan teoritik.

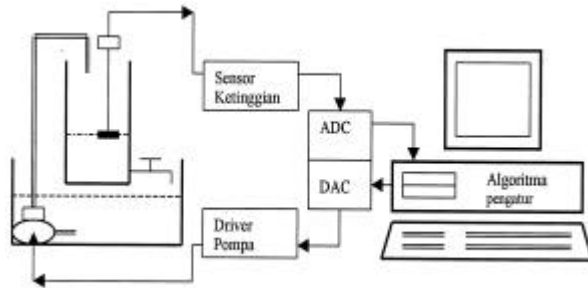
2. Prinsip Kerja Sistem Pengatur Ketinggian Air pada Tangki

Blok diagram dari bagian utama sistem pengatur ketinggian air pada tangki tunggal ini ditunjukkan pada gambar 1. Ketinggian permukaan air yang diinginkan (h) diketikkan melalui komputer dan selanjutnya dijadikan sebagai sinyal masukan sistem. Sinyal masukan yang digunakan adalah fungsi *step*, fungsi *ramp* dan fungsi sinusoidal.



Gambar 1. Blok Diagram Sistem Pengatur Ketinggian Air

Masing-masing fungsi tersebut diimplementasikan dalam perangkat lunak. Ketinggian permukaan air yang terjadi (z) dideteksi oleh sebuah sensor dan hasil pengukurannya dijadikan sebagai sinyal umpan balik. Sinyal masukan dan sinyal umpan balik selanjutnya dibandingkan oleh elemen komparator.



Gambar 2. Konfigurasi Fisik Sistem Pengatur

Hasil komparasi dari kedua sinyal ini menghasilkan sinyal kesalahan (e) dan menjadi masukan pada elemen pengatur. Fungsi pengatur yang digunakan adalah; Pengatur dua posisi (*on-off*), pengatur proporsional, pengatur integral, pengatur derivatif, pengatur proporsional integral dan pengatur proporsional integral derivatif. Semua tipe pengatur ini juga diimplementasikan dalam perangkat lunak.

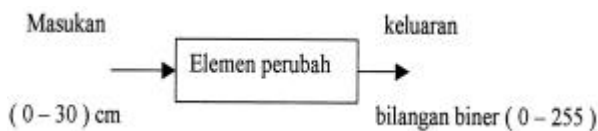
Sinyal kesalahan bernilai positif ($e=r-b>0$) jika ketinggian air yang terukur (yang terjadi) lebih rendah dari ketinggian air yang diinginkan. Selanjutnya sinyal pengatur akan menggerakkan pompa sesuai dengan fungsi pengatur yang digunakan. Sebaliknya sinyal kesalahan bernilai negatif jika ketinggian air yang terjadi lebih tinggi dari ketinggian yang diinginkan. Pada kondisi tersebut sinyal pengatur akan mematikan pompa. Gambaran fisik dan sistem pengatur ini secara skematis ditunjukkan pada gambar 2.

3. Pemodelan Elemen-elemen Sistem

Pemodelan dilakukan untuk semua elemen kecuali pada elemen pengatur karena model matematikanya dapat ditentukan secara pasti.

3.1 Elemen Perubah

Untuk mengatur dan mengolah data pada sistem ini diperlukan komputer digital yang bekerja menggunakan sistem bilangan biner. Untuk itu diperlukan elemen perubah yang dapat merubah nilai masukan tinggi permukaan air yang diinginkan menjadi bilangan biner.



Batas ketinggian air yang direncanakan adalah antara 0 hingga 30 cm sedang elemen perubah yang digunakan memiliki 8 bit atau memiliki 256 (2^8) bilangan biner. Ketinggian air 0 cm dinyatakan dengan bilangan biner nol dan ketinggian 30 cm dinyatakan dengan bilangan biner 255. Jika masukan dan keluaran masing-masing dinyatakan dengan parameter h dan r maka pemodelan dari elemen perubah ini dapat dinyatakan dengan fungsi alih sebagai berikut :

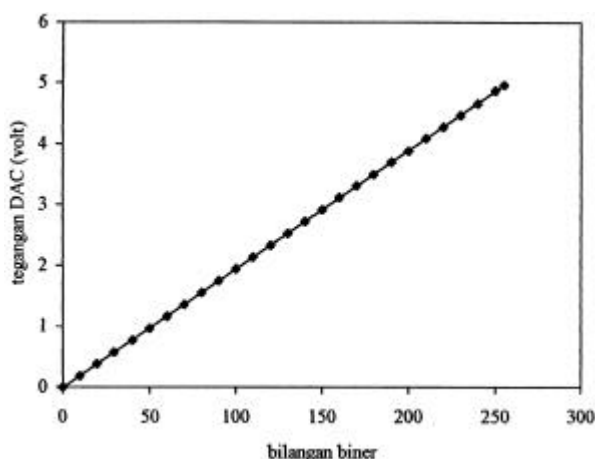
$$r = 8,5 h \quad (1)$$

3.2 Elemen Digital to Analog Converter (DAC)

Elemen ini untuk mengubah sinyal digital dengan nilai antara 0 hingga 255 menjadi tegangan analog yang diperlukan untuk driver pompa dengan rantang antara 0 hingga 5 volt. Fungsi alih DAC ditentukan melalui pengujian dengan program pascal. Untuk setiap nilai masukan (u) yang berbeda sinyal eluaran (v) yang terjadi diukur dengan multitester. Hasil pengujian ini diplot sebagaimana gambar 3. Regresi linear dari data pengujian tersebut menghasilkan fungsi alih sebagai berikut :

$$v = 0,0195u \quad (2)$$

(dengan kesalahan = $3,0055 \cdot 10^{-4} \%$)



Gambar 3. Kurva Hubungan antara Masukan (u) dan Keluaran (v) pada DAC

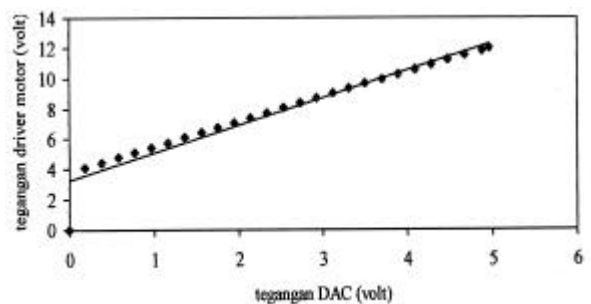
3.3 Elemen Driver Pompa

Elemen driver pompa berfungsi untuk mengubah keluaran dari elemen DAC dengan

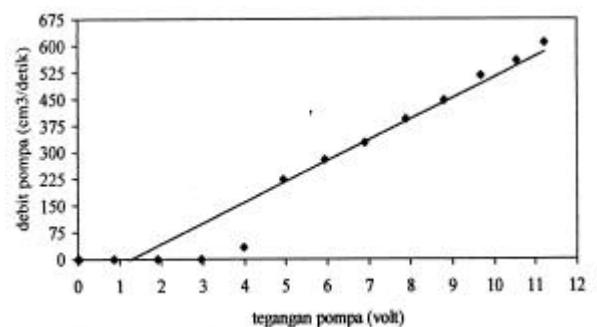
rentang antara 0 hingga 5 volt menjadi tegangan yang diperlukan untuk menggerakkan pompa yaitu 0 hingga 12 volt. Percobaan dilakukan dengan mengukur setiap tegangan masukan dan keluaran dari elemen. Selanjutnya diplot sebagaimana pada gambar 4. Regresi data dari percobaan tersebut menghasilkan fungsi alih sebagai berikut :

$$x = 3,845 + 1,649v$$

(dengan kesalahan = 0.092 %) (3)



Gambar 4. Kurva Hubungan antara Masukan (v) dan Keluaran (x) pada Driver Pompa



Gambar 5. Kurva Hubungan antara Masukan (x) dan Keluaran (y)

3.4 Elemen Pompa

Sinyal masukan pada elemen ini berupa tegangan yang dapat bervariasi antara 0 hingga 12 Volt DC dan keluarannya berupa debit air. Pemodelan dilakukan melalui percobaan dengan mengukur tegangan masukan dan debit pompa. Percobaan diulangi secara bertahap dari tegangan 0 hingga 12 Volt. Plot hasil percobaan tersebut ditunjukkan pada gambar 5. Pada tegangan antara 0 hingga 2 Volt pompa belum berputar karena tegangan yang diberikan masih lebih kecil dari tahanan-tahanan gesek yang ada. Pada tegangan antara 2 hingga 3 Volt sebenarnya pompa sudah berputar akan tetapi belum menghasilkan debit air dengan *head* yang memadai. Debit air mulai terukur ketika pompa diberi tegangan sebesar 4 Volt. Linierisasi data tersebut menghasilkan fungsi alih sebagai berikut :

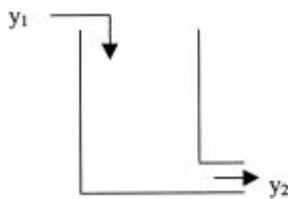
$$y = -95,81 + 61,22x$$

(dengan kesalahan 4,98 %) (4)

Kesalahan linierisasi ini terbesar terjadi pada tegangan rendah disekitar 2 volt.

3.5 Pemodelan Tangki

Secara sistematis sistem tangki yang akan dimodelkan terlihat seperti gambar 6. Pada tangki tersebut terdapat masukan air dari pompa dengan debit y_1 dan keluaran melalui katup pertama dengan debit y_2 . Keluaran melalui katup kedua tidak dimodelkan di sini karena secara operasional katup ini hanya akan difungsikan sebagai pengaman saja.



Jika luas penampang tangki adalah A dan ketinggian air di dalam tangki adalah z maka hubungan antara parameter parameter tersebut dapat dinyatakan sbb :

$$dz = (y_1 + y_2) / A \, dt \quad (5)$$

Besarnya y_2 tergantung dari ketinggian air di dalam tangki dan konstanta aliran melalaui katup pertama. Aliran melalui katup ini agak sulit dimodelkan secara analitis karena penampang dan kondisi aliran di dalam katup tidak dapat terdeteksi dengan baik. Untuk menentukan y_2 dilakukan percobaan dengan y_1 yang tetap dan dalam interval h tertentu. Percobaan dilakukan untuk tiga posisi bukaan katup. Untuk bukaan katup dengan satu putaran, dua putaran dan tiga putaran masing-masing menghasilkan y_2 sebesar : 22 ; 81, dan 141 cm^3/detik . Tangki yang digunakan untuk pemodelan ini memiliki luas 268 cm^2 sehingga untuk masing-masing bukaan katup persamaan 5 dinyatakan sebagai berikut :

$$dz = (y_1 + 22) / 268 \, dt \quad (5a)$$

$$dz = (y_1 + 81) / 268 \, dt \quad (5b)$$

$$dz = (y_1 + 141) / 268 \, dt \quad (5c)$$

3.6 Elemen Sensor Ketinggian

Pemodelan sensor ketinggian air dilakukan dengan mengukur tinggi permukaan air di dalam tangki dan besarnya tegangan keluaran dari sensor tersebut. Batas ketinggian yang

diukur adalah antara 0 hingga 30 cm dengan tegangan analog keluaran antara 0 hingga 5 Volt. Linierisasi hasil pengujian elemen sensor ini menghasilkan persamaan sebagai berikut :

$$a = -7,19 \cdot 10^{-4} + 1,67z$$

(dengan kesalahan $2,05 \cdot 10^{-5} \%$) (6)

dimana a : tegangan listrik yang dihasilkan oleh sensor pada saat ketinggian permukaan air z cm.

3.7 Elemen ADC

Sebagaimana elemen DAC pemodelan ADC juga dilakukan dengan cara yang sama. Elemen diberi masukan berupa tegangan analog yang bervariasi dan setiap keluarannya dapat dilihat pada monitor komputer. Data pengujian elemen ini menghasilkan persamaan fungsi alih sebagai berikut :

$$b = -0,09 + 51,02a$$

(dengan kesalahan $1,58 \cdot 10^{-3} \%$) (7)

Dimana b adalah bilangan biner yang terjadi ketika tegangan analog yang diberikan sebesar a Volt.

4. Pemodelan dan Validasi Sistem Pengatur Ketinggian Air

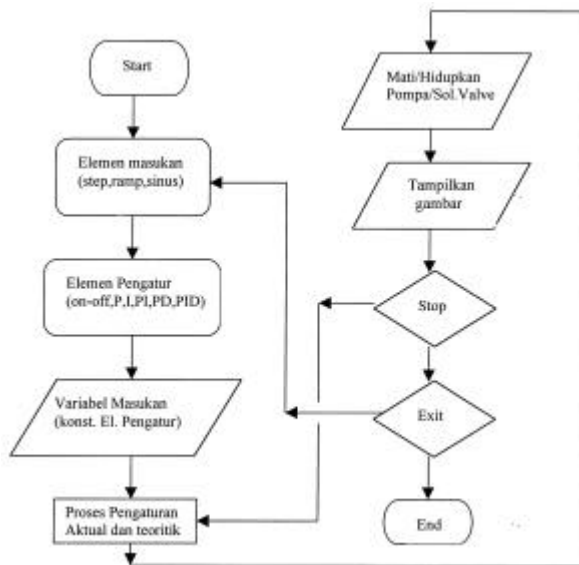
Pemodelan sistem secara keseluruhan tersusun dari fungsi alih tiap elemen sebagaimana konfigurasi pada gambar 1. Selanjutnya dibuat program dengan algoritma sebagaimana pada gambar 7. Hasil pemodelan teoritik secara keseluruhan dapat disimulasikan dengan melihat respon sistem pada monitor komputer. Sedang hasil pengukuran dari permukaan air yang terjadi juga dapat ditampilkan secara bersama-sama. Dengan demikian dari kedua respon dapat dipakai untuk memvalidasi pemodelan sistem. Simulasi dan validasi dilakukan untuk setiap tipe masukan dan tipe pengatur yang ada. Beberapa hasil pemodelan dan validasi tersebut ditunjukkan dalam lampiran.

Pada umumnya respon sistem yang sesungguhnya lebih lambat dari respon sistem teoritik. Hal ini terjadi karena proses pengolahan respon riil lebih panjang sehingga memerlukan waktu proses lebih lama. Pada sistem pengatur *on-off* dengan fungsi *step* dalam percobaan tersebut ketinggian muka air yang diinginkan 150 mm dengan batas simpangan atas dan batas bawah masing-masing maksimum 20 mm. Kenaikan permukaan air terjadi ketika debit air dari pompa lebih besar dari

debit yang keluar dari tangki. Ketika ketinggian air di dalam tangki sudah melebihi batas atasnya maka pompa akan mati secara otomatis. Oleh karena itu plot hasil pengujian menunjukkan bahwa slope kenaikan air tidak simetris dengan slope penurunan air.

Steady state error (SSE) pada sistem pengatur proporsional dengan masukan fungsi *step* juga nampak dalam pengujian ini. Perbedaan nilai SSE yang kecil antara kurva teoritik dan aktual menunjukkan pemodelan sistem ini cukup baik. Pada sistem pengatur integral dengan masukan fungsi *step* nampak terjadi *over shoot*. Besarnya *over shoot* yang terjadi tergantung dari konstanta integral yang digunakan.

Konstanta yang besar menimbulkan terjadinya *over shoot* yang tinggi tetapi waktu untuk mencapai nilai yang diinginkan menjadi lebih singkat.



Gambar 7. Diagram Alir Program Sistem Pengatur Ketinggian Air

Pada sistem pengatur proporsional integral dengan masukan fungsi *step* juga dapat terjadi *over shoot* sebagaimana pada sistem pengatur integral. Bedanya bahwa pada sistem proporsional integral ini nilai yang diinginkan dapat dicapai tanpa osilasi. Nilai SSE sama dengan nol dapat dicapai pada sistem pengatur proporsional integral derivatif baik pada kurva teoritik maupun pada kurva riel. Respon dari fungsi masukan yang lain dapat dilihat pada gambar-gambar terlampir selanjutnya. Nampak disana bahwa kurva kurva riel secara umum dapat digambarkan sebagaimana kurva teoritik.

5. Kesimpulan

Pemodelan sistem dapat disusun dari pemodelan elemen-elemen sistem yang diturunkan secara empiris dan dengan linierisasi fungsi alih. Hal ini dilakukan karena penyusunan persamaan secara analitis lebih sulit dilakukan. Perbedaan antara kondisi teoritik dan riel tidak dapat dihindari karena faktor alamiah saja yang berkaitan dengan ketidak tepatan elemen. Namun demikian perbedaan yang tidak cukup berarti menunjukkan bahwa linierisasi dalam rentang pengaturan yang dibuat masih dapat diterima dan pemodelan sistem dapat menggambarkan perilaku sistem yang sesungguhnya. Jadi pemodelan ini dapat digunakan untuk mensimulasi sistem yang sesungguhnya. Selanjutnya modul ini dapat juga dipakai untuk peraga dalam kuliah sistem pengatur jurusan Teknik Mesin.

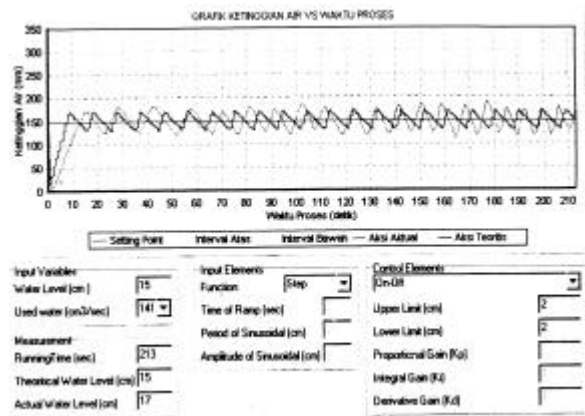
Daftar Pustaka

1. Ogata, K., *Teknik Kontrol Automatik*, jilid 1, Edisi kedua, Erlangga, Jakarta, 1997.
2. Raven, F. H., *Automatic Control Engineering*, McGraw-Hill, Singapore, 1995
3. Saadat, H., *Computational Aids in Control System Using Matlab*, McGraw-Hill, Singapore, 1993.
4. Palm, W. J. *Control System Engineering*, John Wiley & Sons, Singapore, 1986.
5. Jain, R.P. *Modern Digital Electronics*, McGraw-Hill, NewDelhi, 1986.
6. Doebelin, E.O., *Control System Principles and Design*, ELBS, London, 1985

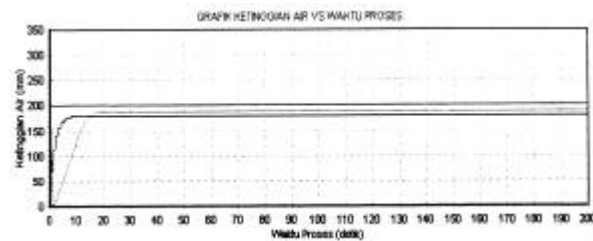
Lampiran

1. Fungsi Step

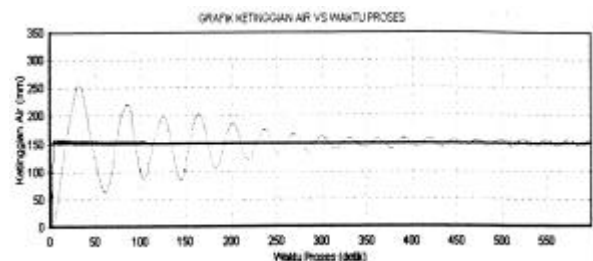
1.1 Pengatur Dua Posisi (On-Off)



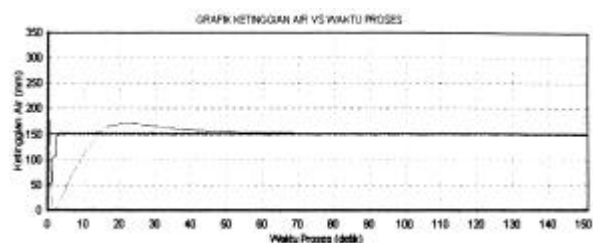
1.2 Pengatur Proporsional



1.3 Pengatur Integral

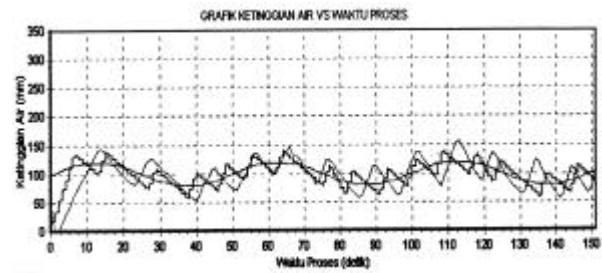


1.4 Pengatur Proporsional dan Integral

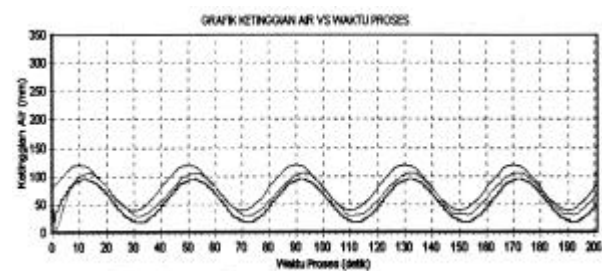


2. Fungsi Sinusoidal

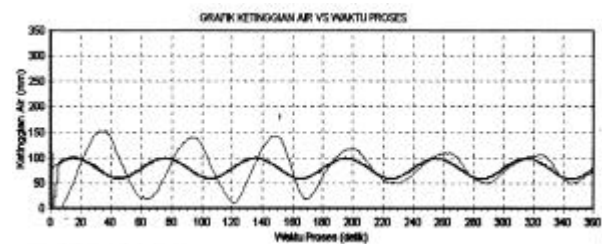
2.1 Pengatur Dua Posisi (On-Off)



2.2 Pengatur Proporsional



2.3 Pengantar Integral



2.4 Pengatur Proporsional dan Integral

